



TITLE:

Study of magnetic field configuration effects
on internal transport barrier formation in
Heliotron J(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Kenmochi, Naoki

CITATION:

Kenmochi, Naoki. Study of magnetic field configuration effects on internal transport barrier formation in Heliotron J. 京都大学, 2016, 博士(エネルギー科学)

ISSUE DATE:

2016-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19826>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により要約は2017-04-01に公開; 許諾条件により要旨は2017-04-01に公開

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	釧持 尚輝
論文題目	Study of magnetic field configuration effects on internal transport barrier formation in Heliotron J (ヘリオトロン J における電子内部輸送障壁の形成機構に与える磁場構造の影響に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、本学エネルギー理工学研究所で稼働中の核融合プラズマ実験装置ヘリオトロン J における電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) プラズマの電子温度・密度分布の時間変化を、著者自らが開発した Nd:YAG トムソン散乱計測システムを主要ツールとして調査し、同装置プラズマにおいて初めて、閉じ込め領域中心部付近に電子内部熱輸送障壁 (eITB) が形成されることを発見し、その輸送障壁形成のための加熱条件、プラズマ条件、ならびに磁場構造の影響を実験的データに基づいて論じた結果をまとめたもので、7 章と Appendix で構成されている。</p> <p>第 1 章は序論として、核融合研究の必要性ならびに環状磁場閉じ込めプラズマ研究における内部輸送障壁研究のこれまでの推移を俯瞰し、内部輸送障壁研究の重要性を指摘した後、本研究の目的を述べている。</p> <p>第 2 章では本研究で対象としたプラズマ実験装置「ヘリオトロン J」の磁場配位であるヘリカル軸ヘリオトロン配位の特徴を述べるとともに、同磁場配位において特徴的な磁場成分であるバンピネス (ϵ_b) 成分の役割を概説し、同装置におけるプラズマ生成・加熱システム、並びにプラズマ計測システムについてまとめている。</p> <p>第 3 章では、輸送障壁形成時におけるプラズマ分布構造の経時変化を調べるためにヘリオトロン J 装置へ特化して設計・製作した、高繰り返し運転 (発振) 可能な Nd:YAG レーザートムソン散乱計測システムについて詳述している。これにより、典型的なプラズマの電子密度 ($0.5\text{-}10\times 10^{19}\text{m}^{-3}$)・電子温度 ($0.1\text{-}1\text{keV}$) および空間分解能 1cm の計測システムを完成させている。</p> <p>第 4 章では、上記トムソン散乱計測システムを用いた分布計測により発見されたヘリオトロン J における eITB の基礎特性が調べられ、輸送障壁形成時の電子温度分布の特徴を詳細に議論、併せて分布計測データに基づく熱輸送解析によりプラズマ中心領域での輸送の改善を確認している。同時に、輸送障壁形成にかかる密度閾値や加熱電力閾値関し評価し、加熱電力で規格化した電子密度が $3\times 10^{13}\text{m}^{-3}\text{W}^{-1}$ を下回るときに輸送障壁が形成されることや、輸送障壁形成・消滅時に中心電子温度－密度曲線にヒステリシス現象が観測されることを示した。さらに、これらの輸送障壁形成は、ヘリカル系磁場閉じ込めにおける新古典理論が予測するコア電子ルート シナリオにより発生する径電場ならびにそのシアによる異常輸送の抑制に起因する可能性を示すことに成功している。</p>			

第 5 章では、輸送障壁形成に与える閉じ込め磁場の三次元構造、特にヘリオトロン J の持つヘリカル軸ヘリオトロン配位に特徴的な閉じ込め磁場のバンピネス (ϵ_b) 成分に着目し、 ϵ_b の異なる三つの配位 (低・中・高 ϵ_b 配位) の下でのプラズマに対する eITB 形成による分布変化を調べ、 ϵ_b が eITB の形状に与える影響を調査した。

第 6 章では、eITB により分布が急峻になる位置 (eITB-foot 位置) が、ある有理面 ($n/m=4/7$) の位置に影響を受けていることを見出すとともに、有理面の有無により、eITB 形成の加熱電力閾値が異なる可能性を提示した。これにより、トロイダル電流制御を介した時間応答性の高い eITB 形成および位置制御の可能性が示唆され、高性能プラズマ生成に重要となる eITB 領域の拡張に寄与できるものと考えられる。

第 7 章では、本研究の総括として、本研究で得られた成果により、磁場構造制御による eITB の形成およびその形成領域制御の可能性が示され、高性能プラズマの生成手法に新たな知見を与えるものであるとまとめている。最後に、今後の展望についても記述している。

なお、Appendix においては、本研究で開発された Nd:YAG トムソン散乱計測システムの優れた特徴の一つである、高精度かつ高速に計測時刻を制御可能とするためのタイミング制御システムについて、その詳細が報告されている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、核融合プラズマ実験装置ヘリオトロン J における電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) プラズマの電子温度・密度分布の時間変化を調査し、同装置プラズマにおいて初めて、閉じ込め領域中心部付近に電子内部熱輸送障壁 (eITB) が形成されることを発見し、その輸送障壁形成のための加熱条件、プラズマ条件、さらには磁場構造の影響を実験的に研究した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

- (1) ヘリオトロン J プラズマにおける遷移的な現象の物理解明を目指し、高い時間・空間分解能を有する Nd:YAG トムソン散乱計測システムの設計・建設を行い、ヘリオトロン J プラズマにおける輸送障壁の構造を議論する上で十分な精度を持つプラズマ分布データの取得ならびにそのデータベース構築に成功した。
- (2) (1) で開発したトムソン散乱計測システムにより得られた電子温度・密度分布の情報から、ヘリオトロン J の ECH 実験において、非常に急峻な温度分布を持つプラズマが生成されることを初めて観測し、そのために必要な加熱条件 (電力、加熱位置) やプラズマ電子密度の条件を同定した。
- (3) プラズマ分布計測データをもとに、上記非常に急峻な温度分布を持つプラズマ条件での熱輸送解析を行い、急峻な電子温度勾配のある領域では、電子熱輸送が改善されていることを明らかにするなどの検証を重ね、観測された急峻な温度分布が eITB 形成によるものであると結論づけた。
- (4) この eITB 形成に関し、磁場の非軸対称成分 (バンピネス成分) の違いにより eITB の幅・電子温度が変化することを示した。
- (5) 閉じ込め磁気面に低次の有理面の存在することが、eITB 形成位置決定に寄与している可能性を発見し、プラズマ電流を制御することで当該低次有理面位置を移動させる実験により、これを検証した。
- (6) さらに、有理面が存在することで eITB が形成されやすくなっている可能性も指摘した。

以上、本論文は、磁気面の回転変換や磁場の非軸対称性などの磁場配位制御を用いて、電子内部熱輸送障壁の形状を変えることで、閉じ込め中心領域のプラズマ性能を向上させることができる可能性を示唆しており、高性能プラズマの生成手法に新たな知見を与えるものである。よって、本論文は博士 (エネルギー科学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 28 年 2 月 18 日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 2017 年 4 月 1 日以降